

Kritische Studie zur «Mikroradiographie»
unter besonderer Berücksichtigung ihrer
Verwendungsmöglichkeit in der
Zahnheilkunde

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnheilkunde der
Medizinischen Fakultät der Universität Basel

vorgelegt von

ALFONS STUDER

von Solothurn

ZÜRICH 1950

BUCHDRUCKEREI BERICHTHAUS ZÜRICH

Von der Medizinischen Fakultät Basel genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. *O. Müller*, Basel.

Promotion: 5. Juli 1949.

Kritische Studie zur «Mikroradiographie»
unter besonderer Berücksichtigung ihrer
Verwendungsmöglichkeit in der
Zahnheilkunde

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnheilkunde der
Medizinischen Fakultät der Universität Basel

vorgelegt von

ALFONS STUDER
von Solothurn

ZÜRICH 1950

BUCHDRUCKEREI BERICHTHAUS ZÜRICH

Meinem Lehrer Herrn Prof. Oskar Müller gewidmet



Aus der Röntgenabteilung des Kantonsspitals Freiburg (Dozent Dr. E. A. Zimmer)

Kritische Studie zur «Mikroradiographie» unter besonderer Berücksichtigung ihrer Verwendungsmöglichkeit in der Zahnheilkunde

von *Alfons Studer*, Feldbrunnen (Solothurn)

In der Zahnheilkunde hat das Studium der feineren Strukturen im Kiefer, speziell im Alveolargebiet, besondere Bedeutung, wobei es sich meist um die Beurteilung des Periodontalraumes und seiner Umgebung handelt. Zur genaueren Betrachtung der Zahnfilme benutzt man daher häufig Negatoskope mit einer Einrichtung zur Lupenvergrößerung. Es erschien uns wünschenswert, andere Methoden, mit welchen Vergrößerungswirkungen erzielt werden können, zu prüfen und deren Wert zu studieren. In der allgemeinen Röntgenologie besteht schon lange der Wunsch nach einer Vergrößerung mit Röntgenstrahlen. Um so verständlicher ist also dieses Bestreben in der Zahnheilkunde. Ein Röntgenmikroskop gibt es noch nicht. Jedoch hat *Vallebona* im Jahre 1928 den Versuch unternommen, mit Röntgenstrahlen eine Vergrößerungswirkung an Lungen- und Skelettstrukturen zu erreichen.

Prinzip der Methode:

Vallebona * hat eine Methode zur «Röntgenmikroskopie» angegeben. Da die technischen Angaben dazu nicht ausführlich sind,

* *Vallebona, A.*: Studio di un metodo di microradiografia. *Liguria medica* 12; 1928.

und ihr Wert leider nicht deutlich genug aus den Reproduktionen hervorgeht, untersuchen wir zuerst prinzipiell seine Arbeit, die er betitelt: «Studio di un metodo di microradiografia.» Ein wichtiger Teil unserer kritischen Studie umfaßt also das Festlegen der Bedingungen der Aufnahmetechnik, an die sich zwanglos die Strukturuntersuchungen im Zahn- und Kiefergebiet anschließen. Die Grundlage der *Vallebonaschen* Idee ist das Lochkamera-Prinzip, bei welchem durch Einblendung der Lichtstrahlen in einem winzigen Loch die Divergenz der Strahlen erreicht wird.

Bei der üblichen Röntgenaufnahme ist das Objekt möglichst nahe am Film und stellt sich deshalb in fast natürlicher Größe relativ scharf dar (Abb. 1a). Entfernen wir dieses aber vom Film, so wird es erheblich vergrößert abgebildet und zeigt um einen mittleren Kernschatten eine Zone von Halbschatten (Abb. 1b).

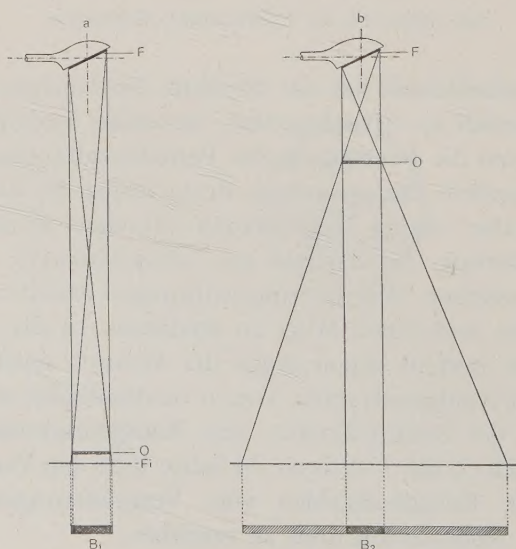


Abb. 1a u. 1b

Abbildung 1 a zeigt uns die normalen Projektionsverhältnisse von randständigen Röntgenstrahlen, wobei das Objekt (O) nahe dem Film (Fi) liegt. Das Resultat ist eine scharfe Abbildung des Objektes in annähernd normaler Größe (B_1). Abbildung 1 b zeigt uns die Ver-

hältnisse bei Vergrößerung der Objekt-Film-Distanz. Das Resultat ist ein vergrößertes, vollständig unscharfes Bild (B_2).

Ganz anders wird nun das Resultat durch Anwendung des Lochkammerverfahrens übertragen auf die Röntgenphotographie. Schiebt man nämlich eine kleine runde Lochblende – Sekundärfokus (Abb. 2: Sf) – zwischen Objekt (O) und dem relativ großen Brennfleck (F) der Röntgenröhre ein, so werden die Strahlen im neuen Brennpunkt (Sf) gekreuzt und gehen von dort als sekundär-divergierendes Strahlenbündel weiter. Da dieser sekundäre Strahlenkegel von einer praktisch punktförmigen Lichtquelle kommt, liefert er uns scharfe Bilder. Wir gehen später auf die Faktoren, welche die Bildschärfe beeinflussen, noch näher ein.

Die Strahlen gehen von der Brennofläche F aus. Radiär ausstrahlend, fallen sie auf die Lochblende aus Blei (Sf). Jene Strahlen, die das Loch passieren, bilden einen sekundären Strahlenkegel, der das Objekt (O) auf dem Film mit einer ganz bestimmten Vergrößerung abbildet.

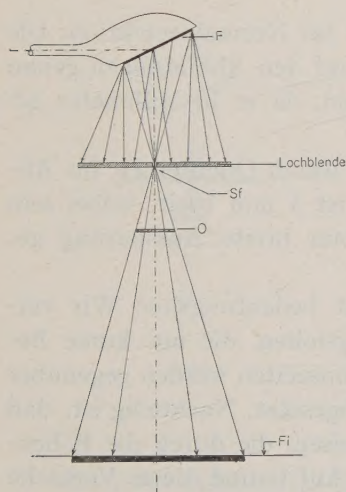


Abb. 2

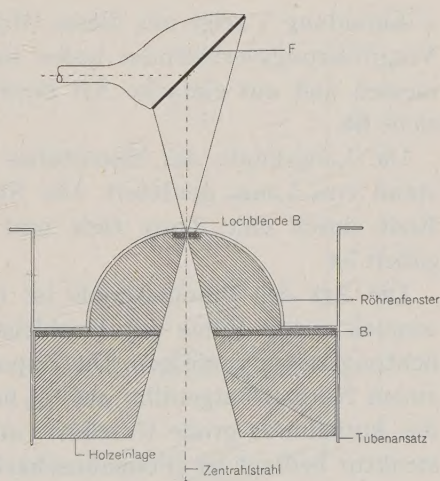


Abb. 3

Versuchsanordnung:

Für die Versuche benützen wir die Siemenskugel, die in der Zahnheilkunde allgemein Verwendung findet. Um die Lochblende

möglichst nahe an den Brennfleck der Röhre zu bringen, wurde das Cellophanfenster der Schutzhülle des Apparates entfernt. Die Möglichkeit, verschiedene Blenden benützen und sie einfach auswechseln zu können, verschaffte uns eine Holzeinlage, die mit der Form des Röhrenfensters des Tubusansatzes übereinstimmt.

Abbildung 3 zeigt uns das Modell der Lochblende aus Blei (B), wobei B bei Exposition zum Sekundärfokus wird. B₁ ist eine zweite Lochblende aus Blei zur Verhinderung der Bildung von Streustrahlen, die im Raum zwischen B und B₁ entstehen. Das Loch der Blende ist glattwandig gebohrt und hat überall denselben Durchmesser.

Als Objektmodell wurde ein kleiner Eisenstab verwendet, der sich leicht abbilden läßt:

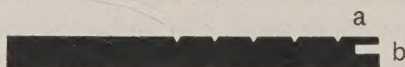


Abb. 4

Abbildung 4 zeigt uns dieses Objekt bei Normalprojektion. Die Vergrößerungsverhältnisse lassen sich auf den Abbildungen genau messen und auf einfache Art berechnen, da er in Millimeter gezeichnet ist.

Die Längsseite des Eisenstabes ist durch Querkerben im Abstand von 5 mm graduiert. Der Stab ist 4 mm breit, wobei sein Ende durch eine 3 mm tiefe und 1 mm breite Aussparung gegabelt ist.

Die Art des Filmmaterials ist nicht bedeutungslos: Wir verwenden zuerst Filme mit Hochleistungsfolien, die nur kurze Belichtungszeiten benötigen. Die Expositionszeiten werden gegenüber einem Normalröntgenfilm auf $\frac{1}{10}$ herabgesetzt. Nachteilig ist, daß die Aufnahmen große Unschärfe aufweisen, die durch die Folienstruktur bedingt ist (Folienunschärfe). Auf Grund dieser Versuche waren wir gezwungen, Filme ohne Folie zu verwenden (Sinofilme).

Zahnfilme eigneten sich wegen ihres zu kleinen Formates nicht gut, da wir durch das außerordentlich kleine Strahlenbündel gezwungen waren, die Bildzentrierung mit Hilfe einer besonderen Zielvorrichtung vorzunehmen. In unseren Versuchen haben wir den gewünschten Objektpunkt (Eisenstabmodell, später Wurzelspitzen

im Unterkiefer) mittels eines Lotes in die passende Lage gebracht und auf diese Art die gewünschte Zone abgebildet.

Zur Ausschaltung der Streustrahlung benützen wir einen Lysholm-raster, der aus feinen, parallelstehenden Bleilamellen besteht, welche schrägeintreffende Streustrahlen absorbieren. Es hat sich jedoch bei den Skelettversuchen eher als nachteilig erwiesen, Raster zu verwenden, worüber wir in der Folge noch berichten werden.

Betrachtungen über die Natur des Bildes.

Vergrößerungswirkung:

Prinzipiell sollte es möglich sein, mittels dieses Sekundärfokus und seinem divergierenden Strahlenbündel von einem Objekt jede gewünschte Vergrößerung zu erhalten durch einfaches Annähern des Objektes an den Sekundärfokus (Abb. 5). Inwieweit hier Grenzen gesetzt sind, werden die Versuche zeigen.

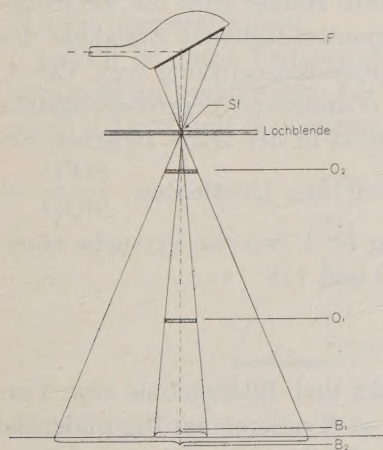


Abb. 5

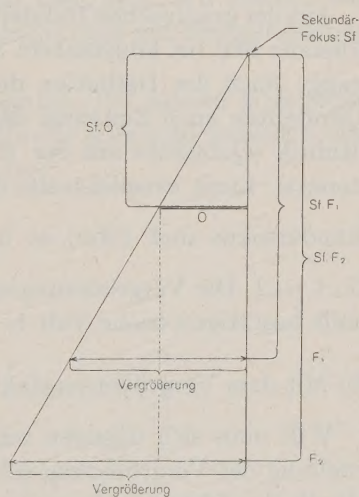


Abb. 6

Die Abbildung 5 zeigt uns bei einem gleich großen Objekt und bei verschiedener Objekt-Film-Distanz das Bildergebnis B_1 und B_2 . Die Strahlen gehen vom Brennfleck F der Röntgenröhre aus. Jene,

welche die Lochblende passieren, also vom Sekundärfokus ausgehen, divergieren und liefern uns vom filmnahen Objekt O_1 das Bild mit der Bildgröße B_1 , vom filmfernen Objekt O_2 das Bild mit der Bildgröße B_2 .

Messung der Vergrößerungswirkung:

Wir können die Vergrößerungswirkung auf zwei Arten berechnen:

- a) mit dem Quotienten und
- b) mit dem Vergrößerungsfaktor.

a) Mit dem Quotienten:

Um die verschiedenen Vergrößerungswirkungen maßstäblich festzulegen, wählte ich verschiedene Abstände zwischen Sekundärfokus-Objekt (SfOD) und zwischen Sekundärfokus-Film (SfFD). Das Verhältnis dieser Distanzen bezeichnen wir als Quotienten, der durch den Bruch $\frac{\text{SfFD}}{\text{SfOD}}$ ausgedrückt wird.

Aus der graphischen Darstellung (Abb. 6) geht hervor: Je größer die Distanz SfF bei konstantem SfO, desto stärker wird die Vergrößerung. Nach der Definition des Quotienten bedeutet Zunahme des Quotienten auch Zunahme der Vergrößerungswirkung (vgl. Tab. 1, Rubrik «Quotient» mit der Rubrik «Gemessene Vergrößerungsfaktoren»). Liegt beispielsweise das Objekt in der Mitte zwischen Sekundärfokus und Film, so haben wir den Quotienten: $\frac{\text{SfFD}}{\text{SfOD}} = 2 : 1 = 2$. Die Vergrößerungswirkung ist 2, was die Versuche ebenfalls bestätigen (siehe Tab. 1, Nrn. 9 und 11).

b) Mit dem Vergrößerungsfaktor:

Will man sich dagegen aus Objekt und Bildergebnis eine Vorstellung der Vergrößerung schaffen, so dividieren wir die Bildgröße durch die Objektgröße und erhalten so den Vergrößerungsfaktor.

Aus Abbildung 7 soll die Beziehung zwischen Quotienten und Vergrößerungsfaktor hervorgehen. Aus ihr ist ersichtlich, daß es sich um zwei ähnliche Dreiecke handelt, für welche die Proportion gilt:

$$a : b = c : d$$

Durch Umrechnung erhalten wir:

$$\frac{a}{b} = \frac{c}{d} \quad \frac{d}{b} = \frac{c}{a}$$

$$\frac{d}{b} \text{ bedeutet } \frac{\text{SfFD}}{\text{SfOD}} = \text{Quotient}$$

$$\frac{c}{a} \text{ bedeutet } \frac{\text{Bildgröße}}{\text{Objektgröße}} = \text{Vergrößerungsfaktor,}$$

also ist zahlenmäßig der Quotient = dem Vergrößerungsfaktor.

Kritik:

Im Versuche läßt sich der Quotient genauer bestimmen, da die einzelnen Abstände groß sind und daher gut gemessen werden können. Im Gegensatz dazu stößt man bei der Bestimmung der Daten für den Vergrößerungsfaktor auf Meßschwierigkeiten, da die Abstände auf den Bildaufnahmen sehr klein sind. Wir ersehen aus Tabelle 1, daß die berechneten Werte nicht ganz mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

Jedoch ist diese Fehlerquelle zu gering, um unsere Ergebnisse nachteilig zu beeinflussen. Die Fehlerbreite schwankt zwischen maximal 0,4 mm (gilt für gemessene Werte).

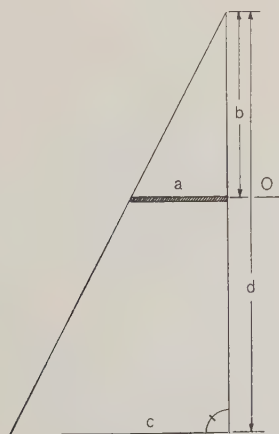


Abb 7

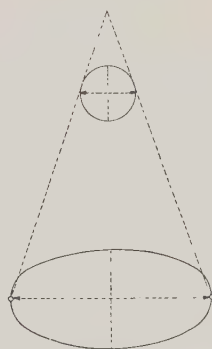


Abb 8

Verzerrungsphänomen:

Dieses Phänomen erläutern wir durch die Abbildung 9a und 9b, nachdem wir durch den Versuch festgestellt haben, daß bei der Projektion von einem kreisrunden Objekt eine elliptische Abbildung von ihm entsteht (Abb. 8).

Grundlage dieser Tatsache bildet der schräg gestellte Brennfleck der Röntgenröhre, was deutlich aus folgenden Abbildungen hervorgeht:

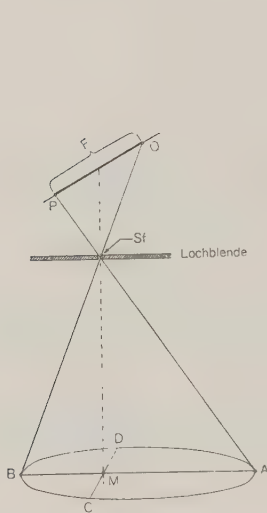


Abb. 9a

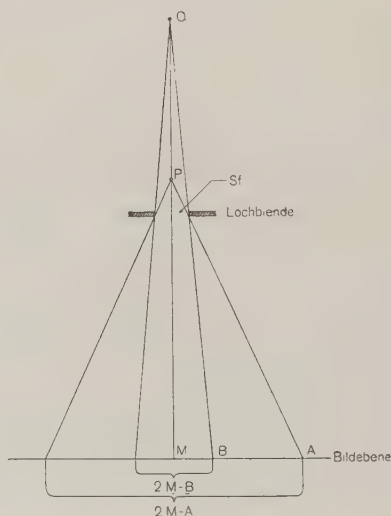


Abb. 9b

Zeichnerisch läßt sich der Strahlengang (Abb. 9a), der zur elliptischen Abbildung des Sekundärfokus (rundes Blendenloch) führt, gut darstellen. Zur genaueren Erklärung dieser Ellipse der Abbildung 9a sind in Abbildung 9b die Endpunkte des Brennfleckes F (Abb. 9a), nämlich P und Q übereinander gedacht. Wesentlich ist ihr verschiedener Abstand von Sf. Der näher dem Sf gelegene Punkt P ergibt eine größere Divergenz seiner Strahlen (Abb. 9b), führt also zu einer stärkeren Vergrößerung in Richtung $M \rightarrow A$ (Abb. 9b). Der weiter vom Sf entfernte Fokuspunkt Q ergibt eine kleinere Divergenz seiner Strahlen, was zu einer schwächeren Vergrößerungswirkung in Richtung $M \rightarrow B$ (Abb. 9b) führt.

Es resultiert also eine in den verschiedenen Richtungen ungleichmäßige Vergrößerung, die wir als Verzerrung bezeichnen.

Aus den Versuchen geht hervor, daß die Verzerrung nicht eine Konstante ist, die nur von der Stellung des Brennfleckes abhängig wäre, sondern im Gegenteil noch von verschiedenen Faktoren beeinflußt wird, auf die wir im folgenden Abschnitt näher eingehen.

Diese Tatsache erstaunt um so mehr, als wir doch an der Stellung des Brennfleckes nichts verändern. Auffallend ist, daß sich die Verzerrung außerordentlich stark bemerkbar macht, wenn wir das Loch der Blende vergrößern. Folgende Zeichnungen (Abb. 10a und 10b) mögen zur Erläuterung des Textes dienen:



Abb. 10a



Abb. 10b

Bei verschiedenen Lochdurchmessern wird der Modelleisenstab jeweils anders abgebildet, wobei Abbildung 10a, aufgenommen mit großem Lochblende-Durchmesser, eine außerordentliche Verzerrung zeigt, während Abbildung 10b, aufgenommen mit kleinem Lochblendedurchmesser, keine oder nur eine geringe Verzerrung aufweist.

Zeichnerisch wieder läßt sich dieses Phänomen so erklären: Bei großem Durchmesser, wie wir ihn zur Aufnahme der Abbildung 10a verwenden, liegen die Endpunkte P und Q der Abbildung 9a und 9b weit auseinander: die Schrägstellung des Brennfleckes kann sich also stärker auswirken. Entsprechend diesem Auseinanderliegen der Punkte P und Q bildet der Strahl, der von P ausgeht, einen Punkt von Sf ab, der viel weiter von M entfernt liegt, als jener, der von Punkt Q abgebildet wird, das heißt es kommt zu einer starken Verzerrung. Nähern sich diese Punkte P und Q auf der Brenn-

fläche – indem wir einen kleinen Lochblende-Durchmesser einschalten – so erreichen sie theoretisch einen punktförmigen Fokus, der uns ein annähernd ideales, verzerrungsfreies Bild liefert (Abb. 10b). Die Versuche zeigen eindeutig auch die Abhängigkeit der Verzerrung vom Quotienten, das heißt vom Verhältnis der Distanzen SfOD und OFD. Die Versuchsserien mit Variation des Quotienten ergaben eine starke Reduktion dieser Verzerrung bei der Wahl des Distanzverhältnisses 2 : 1. Es lag uns also daran, diese drei Faktoren:

1. Stellung des Brennfleckes,
2. Lochblende-Durchmesser,
3. Distanzverhältnisse,

die das Bild wesentlich beeinflussen, in den weiteren Versuchen möglichst konstant zu halten. Wir versuchten daher in Abbildung 11 eine vereinfachte Darstellung des annähernd verzerrungsfreien Gebietes wiederzugeben, wobei auf der Abszisse die Objekt-Film-Distanz abgetragen wurde und auf der Ordinate der Vergrößerungsfaktor.

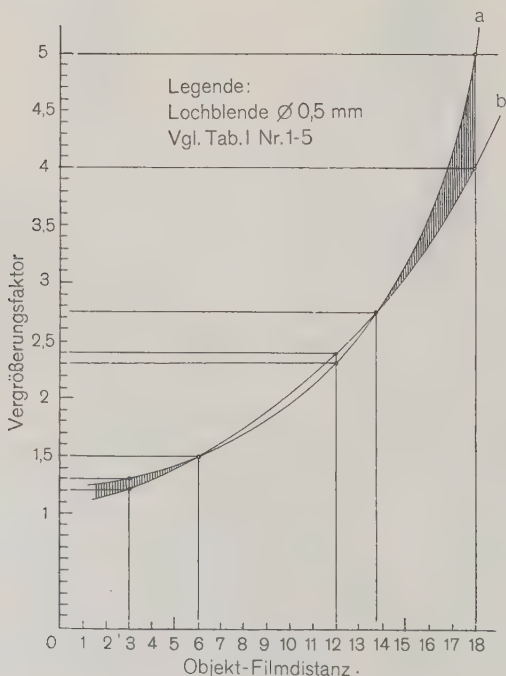


Abb. 11

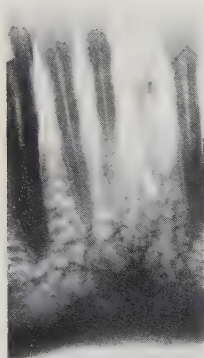


Abb. 12a

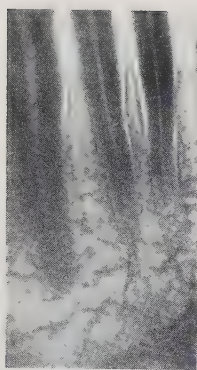


Abb. 12b



Abb. 12c

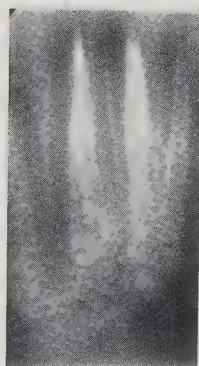


Abb. 12d

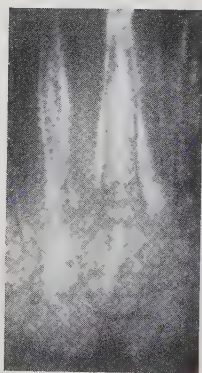


Abb. 13a



Abb. 13b

Um dieses verzerrungsfreie Gebiet auf einen Blick zu übersehen, setzten wir den Vergrößerungsfaktor in Beziehung zur Objekt-Film-Distanz. Mit Vergrößerung der Objekt-Film-Distanz nimmt ja der Vergrößerungsfaktor zu.

Auf Kurve a ist der Vergrößerungsfaktor in Querrichtung, auf Kurve b die entsprechenden Vergrößerungsfaktoren in Längsrichtung eingetragen. Dort wo die beiden Kurven sich decken, haben wir keine Verzerrung; wo sie voneinander abweichen, weisen die Aufnahmen Verzerrung auf. Wie aus der graphischen Darstellung hervorgeht, gibt es aber nur zwei Schnittpunkte, wo die beiden Kurven sich kreuzen. Dazwischen liegt ein Feld, eingeschlossen von Kurve a und b, das bei kleinem Lochblende-Durchmesser einer relativ geringen Verzerrung entspricht, die wir optisch kaum mehr feststellen können. Die Messungen zeigten so geringe Abweichungen, daß sie, innerhalb der Fehlergrenze liegend, für die Beurteilung unserer Versuche bedeutungslos sind.

Zur vorhin erwähnten *elliptischen Verzerrung* kommt also noch eine andere hinzu, die wir als *Eigenverzerrung* (in Abb. 11 durch das unschraffierte Feld dargestellt) bezeichnen. Zwei Annahmen lassen uns dieses Phänomen einigermaßen erklären: Ist der Durchmesser der Lochblende groß und die Objekt-Film-Distanz über 20 cm, so tritt diese Eigenverzerrung besonders deutlich hervor. Eine Erklärung würde darauf hinausgehen, daß zwei verschiedene Kreuzungspunkte, sogenannte Raumfokuspunkte entstehen können, die uns zwei verschiedene Bilder liefern. Die zweite Annahme wäre, daß durch die Entstehung eines neuen Strahlenkegels an den Kanten der Blende eine neue Lichtquelle mit anderen Divergenzwinkeln entstehen könnte.

Ist das Objekt nahe am Film, so wirken sich diese Sekundärstrahlen, die vom Objektrand ausgehen, nicht störend aus. Entfernen wir aber das Objekt vom Film, so wirken sich diese Sekundärstrahlen, ausgehend von einem «falschen» Fokuspunkt am Blendenrand oder ausgehend vom «falschen» Fokuspunkt vom Objektrand als störend aus und ergeben so eine zusätzliche Verzerrung des abgebildeten Objektes: die sogenannte Eigenverzerrung.

Bildschärfe:

Die Schärfe eines Bildes hängt von verschiedenen Faktoren ab,

die wir in den kommenden Versuchen optimal gestalten wollen, indem wir den Abstand des Objektes günstig wählen, die Streustrahlung möglichst ausschalten und durch ein geeignetes Filmmaterial die Filmstruktur zu beeinflussen versuchen.

Wir haben ja die Möglichkeit, die Entfernung des Brennfleckes vom Objekt, die Dicke des Streuungsmediums und die Größe des Brennfleckes so oft zu variieren, bis wir ein Optimum gefunden haben.

Bildausschnitt:

Die Größe des Bildausschnittes richtet sich nach dem Durchmesser der Lochblende. Schon daraus ersehen wir, daß wir uns in ganz bestimmten Grenzen bewegen müssen, welche durch die Versuche festgelegt werden sollen.

Eigene Versuche mit dem graduierten Metallstab.

Erste Versuchsserie: Mit konstantem Lochblende-Durchmesser

Für diese Versuche eignete sich der graduierte Modellstab. Der Lochblende-Durchmesser wurde dabei konstant gehalten. In dieser Art führten wir etwa 30 Versuche aus, von denen eine Serie von 11 Varianten detailliert besprochen werden sollen.

Tabelle 1

Nr.	Ø des Modellstabes mm	SfFD : SfOD	Quotient	Gemessene Vergrößerungs- faktoren		Expos. -Zeit
1.	0,5	20 : 17	1,17 : 1	1,27	1,14	4"
2.	0,5	20 : 14	1,43 : 1	1,50	1,50	4"
3.	0,5	20 : 10	2,00 : 1	1,90	1,90	5"
4.	0,5	20 : 8	2,50 : 1	2,30	2,40	4"
5.	0,5	40 : 37	1,09 : 1	1,17	1,10	4"
6.	0,5	40 : 34	1,17 : 1	1,25	1,18	6"
7.	0,5	40 : 28	1,40 : 1	1,40	1,33	6"
8.	0,5	40 : 22	1,80 : 1	1,70	1,68	8"
9.	0,5	40 : 20	2,00 : 1	2,00	2,00	8"
10.	0,5	40 : 13,3	3,00 : 1	2,80	2,80	8"
11.	0,5	45 : 22,5	2,00 : 1	2,00	2,00	10"

Durch Änderung der SfOD wurden in den 11 Versuchen Vergrößerungen von 1,1- bis 2,8mal erzielt. In einigen Fällen (Nrn. 1, 4, 5, 6, 7, 8) zeigte die Bildausmessung unerwarteter Weise in zwei zueinander rechtwinklig stehenden Richtungen verschiedene Vergrößerungsfaktoren, was wir als Verzerrung beschrieben und definiert haben.

Unter Rubrik «Vergrößerungsfaktor» bedeutet die erste Kolonne Vergrößerung in Querrichtung; die zweite Kolonne Vergrößerung in Längsrichtung. Diese Ausmessungen wurden durch den graduiereten Modelleisenstab ermöglicht (vgl. Abb. 4). Darauf betragen die Strecken $a = 5 \text{ mm}$; $b = 4 \text{ mm}$.

Mißt man nun die Strecken an einem vergrößerten Bild, so erhalten wir zum Beispiel $a = 10 \text{ mm}$; $b = 7 \text{ mm}$. a und b sind also nicht im selben Maße vergrößert, sonst müßte $b = a \text{ mm}$ betragen. Diese Differenz bedeutet den maßstäblich gefundenen Wert für die Verzerrung. Unser Bestreben lag also darin, denjenigen Lochblende-Durchmesser und denjenigen Quotienten zu suchen, bei dem die Verzerrung möglichst gering oder überhaupt nicht vorhanden ist. Wie die Versuche zeigen (vgl. Nrn. 3, 9, 11, Tab. 1), ist dies beim Quotienten $2:1$ der Fall. Damit haben wir mit Berücksichtigung eines geeigneten Bildausschnittes auf empirischem Wege ein optimales Verhältnis von Fokus-Objekt-Distanz gefunden.

Zweite Versuchsserie: Unter Änderung des Lochblende-Durchmessers

Bis jetzt haben wir, wie aus Tabelle 1 hervorgeht, einen konstanten Lochblende-Durchmesser verwendet ($\varnothing = 0,5 \text{ mm}$). Da wir aber nur durch die Variation aller variierbaren Größen zu einer optimalen Aufnahme gelangen, müssen wir auch den Durchmesser der Lochblende verändern. Wir verfügen über 4 Lochblenden mit den Durchmessern von 1,5, 1, 0,5 und 0,3 mm. Mit jeder Blende führten wir Serienversuche mit variiertem und konstantem Quotienten durch.

In Tabelle 2 fassen wir jene Versuchsserien zusammen, die sich unter Anwendung der vier uns zur Verfügung stehenden Lochblenden unter Beibehaltung eines konstanten Quotienten ($2:1$) ergaben.

Serie a mit dem Lochblende-Durchmesser 1,5 mm ergab so un-

Tabelle 2

SfFD : SfOD	Gemessene Vergrößerungsfaktoren								Ber. Vergr.-Fakt.
	Serie a	EZ	Serie b	EZ	Serie c	EZ	Serie d	EZ	
20 : 10	1,67	2"	1,8	4"	1,90	6"	xx	14"	2,00
	1,98		1,95		1,91		xx		
35 : 17,5	1,8	3"	1,76	6"	1,90	8"	xx	16"	2,00
	2,00		1,89		1,90		xx		
40 : 20	1,8	6"	1,9	8"	2,00	10"	xx		2,00
	2,3		1,7		2,00		xx		
45 : 22,5	1,7	6"	1,9	10"	2,00	12"	xx	32"	2,00
	2,1		2,00		2,00		xx		

scharfe Bildergebnisse und so ausgeprägte Verzerrungserscheinungen, daß sie bald ausgeschieden wurde.

Serie b mit dem Lochblende-Durchmesser 1 mm zeigt schon bessere Resultate hinsichtlich Bildqualität. Jedoch ergaben die Messungen geringe Abweichungen von einem einwandfreien Bild, was uns veranlaßte, eine weitere Serie Aufnahmen zu machen, die in qualitativer wie in technischer Hinsicht einwandfreiere Ergebnisse zeitigen sollten:

Serie c mit dem Lochblende-Durchmesser 0,5 mm zeigte einen so eminenten Fortschritt hinsichtlich Bildgüte, Bildausschnitt, Bildvergrößerung und Schärfe, daß wir nur noch der Vollständigkeit halber eine neue

Serie d mit dem Lochblende-Durchmesser 0,3 mm zu Versuchen herangezogen haben. Jedoch war diese letztere Serie mit so vielen technischen Schwierigkeiten verbunden, daß sie für die weiteren Versuche bedeutungslos wurde. Es zeigten sich nämlich Überstrahlungen, mit verschiedenen Licht- und Schattenbildungen gezeichnete Bilder und überdies so kleine Bildausschnitte, daß sie praktisch als unverwertbar aufgegeben wurde.

Aus der Tabelle ist weiter zu ersehen, daß die geringste Schwankungsbreite in der Kolonne Vergrößerungsfaktoren bei Serie c zu finden ist. Es ist also anzunehmen, daß wir mit der Verkleinerung des Lochblende-Durchmessers diese Schwankungsbreite so verringern, daß wir schließlich ein annähernd verzerrungsfreies Bildergebnis erhalten würden. Aus den vorhin geschilderten Schwierig-

keiten waren wir aber gezwungen, mit dem nächst größeren Lochblende-Durchmesser die Versuche weiterzuführen und ihre Vorzüge, auf die wir oben hingewiesen haben, weiter auszubeuten.

Betrachten wir weiter die Kolonne «Belichtungszeit», so ist auffallend, wie mit Verkleinerung des Loches die Belichtungszeiten ansteigen. Sie werden sogar so hoch, daß sie für den Apparat untragbar sind. Mit dem kleinsten Durchmesser 0,3 mm zum Beispiel benötigen wir Expositionszeiten bis zu 32 sec. Folgende Tabelle soll uns noch über das Verhältnis von Lochgröße und Expositionszeit Aufschluß geben.

Tabelle 3

Lochblende Ø	1,5	1	0,5	0,3
Expositions- zeiten	1,5	4	6	14
	2	6	7	16
	4	8	8	22
	6	10	10	28
	8	12	12	32

Die Tabelle zeigt uns die Variationsmöglichkeiten, die uns erlaubten, die Durchschnitts-Expositionszeiten zu finden. Sie ermöglicht uns zugleich die Auswahl der optimalen Resultate für jede Versuchsserie.

Beim Lochblende-Durchmesser 0,5 mm bleibt die Expositionszeit im Rahmen der Belastbarkeit der Brennoffläche dieses kleinen Röntgenapparates.

Ergebnis der Untersuchungen mit dem graduierten Modelleisenstab:

Mittels dieser Untersuchungen am Modelleisenstab ist es uns gelungen, die wichtigsten Daten herauszuarbeiten, die es uns ermöglichen, weitere Versuche am Skelettknochen vorzunehmen. Insbesondere handelte es sich darum, Klarheit zu schaffen über die Distanzverhältnisse von Fokus-Objekt, Objekt-Film, über die Lochblendengröße und die Ausschaltung oder Verminderung von Streustrahlen. Für die Auswahl optimaler Werte bezüglich Vergrößerung,

Bildschärfe und Bildausschnitt standen uns 50 Versuchsserien zur Verfügung. Aus ihnen entwickelte sich das feste Ergebnis mit der Lochblende vom Durchmesser 0,5 mm, dem Quotienten 2 : 1 und der Fokus-Film-Distanz von 45 cm.

Ø	SfFD	Quotient	Gemessene	Vergrößerungsfaktoren	Exp.-Zeit
0,5 mm	45 cm	2 : 1	2,00	2,00	6"

Damit ist die Basis für die weiteren Versuche am Unterkiefer-skelett geschaffen.

Versuche am Unterkieferskelett:

Bei den Versuchen am Unterkieferknochen wurde auf dieselbe Weise vorgegangen wie bei den Modellversuchen. Wir wollen aber die zahlreichen Untersuchungen, die wir zur Prüfung aller technischen Faktoren nochmals durchführen mußten, nicht aufzählen. Erwähnt sei jedoch, daß die Skelettversuche gegenüber den Modellversuchen entsprechend den größeren Anforderungen der Bildergebnisse bedeutend vermehrt wurden.

Neue Schwierigkeiten traten vor allem bei der Zielvorrichtung auf. Mit Hilfe von Markierungspunkten auf dem Knochen wurde das Lot eingestellt und dadurch die Projektion der Wurzelspitzen ermöglicht. Da die Vergrößerungs- und Projektionsverhältnisse im ersten Teil der Arbeit abgeklärt wurden, verlegten wir uns im folgenden lediglich darauf, scharfe und kontrastreiche Bilder zu bekommen.

Um die Bildschärfe zu erhöhen, machten wir Rasterversuche. Dabei mußten die Expositionszeiten verdoppelt und verdreifacht werden, was sich praktisch wegen Überlastung des Apparates nicht bewährt. Und überdies befriedigten die gewöhnlichen Rasteraufnahmen mit stillstehendem Raster nicht, da dessen Lamellenstruktur sich auf dem Bildausschnitt äußerst störend auswirkt. Dieser Umstand veranlaßte uns, den Raster über dem Film zu bewegen. Dadurch verschwand die störende Wirkung. Die Schärfe des Bildes aber wurde nicht wesentlich beeinflußt, da bei dem kleinen Sekundärfokus das Bild ohnehin ziemlich gut struktuiert erscheint. Zudem treten bei der geringen Dicke des Objektes wenig Streustrahlen

auf, die sonst meist die Ursache einer eher verwischten Abbildung sind.

Die Hauptschwierigkeit war nun, Vergrößerung und Schärfe gegeneinander abzustimmen, beziehungsweise zu beantworten, auf welcher Stufe der Vergrößerung die beste Bildschärfe zu erreichen sei.

Das Verhältnis 2 : 1, sowie die Distanz SfFD 45 cm, mit denen wir weitere Versuche ausführten, erwiesen sich wiederum als optimale Werte.

Von ganz besonderer Bedeutung bei den Aufnahmen des Unterkiefers ist, wie oben erwähnt, die Expositionszeit. Dieselbe vergrößert sich ja im Verhältnis zur Verkleinerung der Blendenöffnung. Versuche mit Expositionszeiten von 12, 10, 8, 7, 6, 4, 3 sec zeigten, daß bei 45 cm SfFD und dem oben erwähnten Quotienten 2 : 1 die beste Expositionszeit bei 7 sec liegt. Daraus ergeben sich schon bei den Versuchen ziemlich hohe Expositionszeiten. Bei Anwendung am Lebenden müßten vor allem Hochleistungsapparate zur Verfügung stehen.

Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse.

Mit der Röntgenmikroskopie nach *Vallebona* konnten wir eindeutig eine Vergrößerungswirkung erreichen. In größeren Versuchsreihen wurde die Methode röntgenphysikalisch und aufnahmetechnisch in ihren einzelnen Faktoren studiert. Unter den Ergebnissen unserer Versuchsbedingungen konstatieren wir, daß mit der Siemens-Röntgenkugel die Vergrößerung auf das Doppelte als Optimum anzusprechen ist. Denn mit weiteren Vergrößerungen nimmt die Schärfe ab, die Verzerrung wird größer und der Bildausschnitt zu klein und unübersichtlich. Daher erscheint es vorläufig zweckmäßig, nicht über eine zweifache Vergrößerung hinauszugehen.

Unter diesen Bedingungen erhalten wir diagnostisch verwendbare Röntgenbilder des Zahnunterkiefer-Gebietes, wie sie uns folgende Abbildungen zeigen.

Abbildung 12a ist ein *normales Röntgenbild*, das wir mit gewöhnlicher Aufnahmetechnik dargestellt haben, wobei das Objekt, in diesem Falle der Unterkiefer, während der Exposition direkt auf dem Film liegt. Wie aus den Bildern zu erkennen ist, eignet sich dieses Objekt zum Studium der Struktur und der Vergrößerung.

Unsere Aufnahme ergibt einen Ausschnitt aus dem Frontgebiet des Unterkieferskeletts, der vom 3- bis -2 reicht. Das Bild zeigt die Spongiosa des Unterkiefers, die Frontzähne mit den Interdentalsepten, während unten die dichte Kompakta des Unterkieferrandes das Bild begrenzt. Unser Interesse richtet sich besonders auf die Zahnwurzel, auf die Wurzelspitzen und ihre Umgebung.

Um Vergleiche anstellen zu können, bedienten wir uns einer photographischen Vergrößerung dieses Bildes. Abbildung 12b stellt einen *lupenvergrößerten Ausschnitt* aus Abbildung 12a dar. Diese photographische Methode erlaubte bis heute die einzig mögliche Vergrößerung, um verschiedene Details wie Periodontium, Alveolarknochen und Wurzelspitzen genauer zu beurteilen.

Mit den Abbildungen 12c und d stellen wir einander zwei Röntgenbilder gegenüber, die uns die Wirkung bei Exposition mit und ohne unsere vorgeschaltete Lochblende verdeutlichen. Beide Bildaufnahmen sind bei derselben Objekt-Film-Distanz aufgenommen worden (OFD = 22,5 cm). Abbildung 12c ist das Ergebnis *ohne Lochblende*, während Abbildung 12d das Bildergebnis *mit unserer vorgeschalteten Lochblende* darstellt.

Während die Abbildung 12c infolge Verschwommenheit und Unschärfe des Bildes jegliche Diagnose verunmöglicht, so verbessert sich das Resultat der *Vergrößerungswirkung mittels* der oben beschriebenen *vorgeschalteten Lochblende* («Mikroradiographie») in so wesentlichem Maße, daß wir die Details mit jenen in Abbildung 12b durch Lupenvergrößerung erhaltenen vergleichen dürfen.

Diese Abbildung 12d ist auf Sinofilm aufgenommen, mit Lochblende 0,5 mm, SFD = 45 cm, OFD = 22,5 cm und einer Expositionszeit von 7 sec, wobei im Zentrum des Bildes die Wurzelpartie des 2- liegt.

Die Abbildungen 12b und 12d zeigen uns, wie wir auf zwei verschiedenen Wegen, nämlich durch Lupenvergrößerung (12b) einerseits und Röntgenblendenvergrößerung (12d) andererseits eine Vergrößerungswirkung auf das Doppelte erzielen.

Zum Vergleich der Lupen- und der Röntgenblendenvergrößerung soll ein weiterer Ausschnitt aus dem Gebiet der Wurzelpartie des -1 herangezogen werden. Abbildung 13a zeigt die lupenvergrößerte Aufnahme, während Abbildung 13b eine Aufnahme mit Lochblende darstellt, die unter denselben Bedingungen wie Abbildung 12d auf-

genommen wurde. Auffallend auf dem Bilde 13b ist der kleine Bildausschnitt, bedingt durch den Durchmesser der Lochblende, den wir mit unsern Versuchsbedingungen als optimal ansprechen dürfen.

Im Mittelfeld, in dessen Bereich sich die Wurzeln der beiden 1-1 befinden, ist die Aufhellung an der Wurzelspitze des -1, die Alveolarkompakta und die ganze Struktur der Spongiosa gut zu beurteilen. Im Gegensatz zur lupenvergrößerten Aufnahme zeigt die Abbildung 13b vielleicht eine gewisse Plastizität.

Hinsichtlich der Bildqualität dürfte also die mit lochförmiger Blende angefertigte Aufnahme einen röntgentechnischen Fortschritt bedeuten und einer lupenvergrößerten Aufnahme bildmäßig gleichwertig sein. In Bezug auf die Größe des Bildausschnittes und Expositionszeit müssen unsere Apparate noch angepaßt werden.

Schluß.

Die Versuche zeigen uns also eindrucklich einen röntgentechnischen Fortschritt, indem durch eine Lochblende eine erfolgreiche Vergrößerungswirkung mit Röntgenstrahlen erzielt werden kann. Für die praktische Anwendung sollte jedoch die Belichtungszeit verkürzt, der Bildausschnitt erweitert und das Zielverfahren vereinfacht werden. Die heutige Entwicklung der Kleinröntgenapparate läßt jedoch eine Verbesserung und Erweiterung in diesem Sinne noch nicht zu.

Ihre Bedeutung für die Zahnheilkunde scheint uns allerdings so evident, daß eine geeignete Apparatkonstruktion einen wesentlichen Fortschritt darstellen würde. Im Hinblick auf die zu erwartende Anwendung auf dem Gebiete der Zahnheilkunde dürfte daher die vorliegende Arbeit durch ihre Projektionsstudien eine Anregung sein, die Versuche auf breiterer Basis weiterzuführen.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. *O. Müller*, möchte ich an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank aussprechen für das persönliche Interesse an meiner Arbeit und für das so prägnant abgefaßte Referat über diese Röntgendissertation.

Ebenso möchte ich es nicht unterlassen, Herrn Privatdozent Dr. *E. A. Zimmer*, unter dessen Leitung und Mitarbeit diese Arbeit entstand, meinen gebührenden Dank auszusprechen.

Curriculum vitae

Am 24. Februar 1922 wurde ich in Welschenrohr (Solothurner Jura) geboren. Primar- und Sekundarschule besuchte ich in Solothurn, wo ich 1941 an der Kantonsschule die Maturitätsprüfung bestand. Medizinisches Studium an der Universität Lausanne, Bern und Basel. 1948 Eidg. Staatsexamen in Basel.

